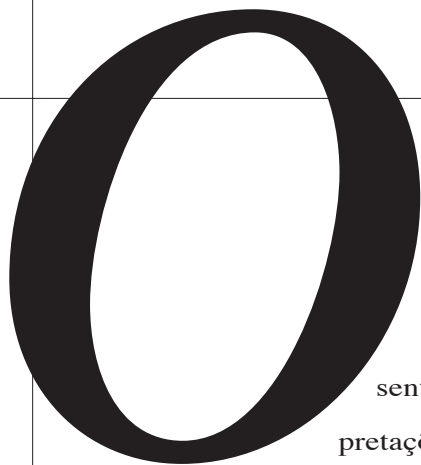




O lado escuro do universo II



UM BREVE INTRÓITO

sentido da palavra *cosmologia* pode ter interpretações diversas segundo a formação do leitor.

Para um humanista, pode significar a representação do mundo desenvolvida por diferentes civilizações, para explicar não somente a origem do cosmo em si, mas igualmente a origem do homem e da condição humana. Mesmo no contexto das ciências exatas, a palavra não tem um sentido único. Para alguns, a cosmologia engloba o estudo da geometria e dos parâmetros dinâmicos do universo, enquanto, para outros, a cosmologia representa o estudo da origem e da evolução de toda energia-matéria contida no universo. É este último conceito que será aqui adotado e que Malcolm Longair denomina simplesmente como “cosmologia astrofísica”.

A cosmologia, nestas últimas décadas, tem sofrido várias revoluções, consequência dos avanços tecnológicos no domínio observacional, tanto no solo como no espaço, de conquistas no domínio das partículas elementares e de suas interações, bem como da formulação de novas teorias da gravitação. Hoje, cosmologistas ousam discutir questões consideradas no passado como *tabus*, tais como o estado do universo pré-big-bang, a existência de universos múltiplos, assim por diante.

Até a metade dos anos 60, o fato mais relevante em cosmologia era a expansão do universo. Nos fins da década de 30, Edwin Hubble, utilizando o telescópio de 2,5 m em Monte Wilson (Califórnia), verificou um deslocamento sis-

J. A. DE FREITAS PACHECO é pesquisador do Observatoire de la Côte d’Azur, em Nice (França).

temático do comprimento de onda das linhas presentes no espectro de algumas galáxias, correlacionado com a magnitude aparente ou, em outras palavras, com o fluxo de energia recebido das mesmas. Esse deslocamento, em direção a comprimentos de onda maiores que os do laboratório, também conhecido como *desvio para o vermelho*, foi interpretado como sendo devido a um efeito Doppler produzido por um afastamento geral das galáxias entre si e que Hubble pôde exprimir pela relação, hoje conhecida como *lei de Hubble*, que diz que a velocidade de expansão é proporcional à distância da fonte, isto é,

$$V = H_0 r$$

onde V é a velocidade da galáxia, r sua distância e H_0 é a chamada constante de Hubble.

A interpretação da lei de Hubble como sendo uma consequência da expansão do universo permitiu de imediato uma explicação do paradoxo de Olbers. No século XIX, Heinrich Olbers imaginava o seguinte: se a distribuição das galáxias é uniforme, o número delas deve crescer com o cubo do raio do volume considerado. Como a intensidade luminosa de um dado objeto varia com o inverso do quadrado da distância, Olbers chegou à conclusão de que a contribuição luminosa total das galáxias deveria crescer diretamente com o raio do volume considerado e, portanto, um universo infinito deveria produzir um brilho do céu infinito, em contradição com o observado. A expansão do universo introduz naturalmente um horizonte, dado pela distância na qual a velocidade de expansão se iguala à velocidade da luz ($d_H \approx c/H_0$), resolvendo o paradoxo. Assim, *a noite é escura* porque o universo se encontra em expansão!

Dentro de uma perspectiva teórica, já em 1917 W. de Sitter havia encontrado uma solução para as equações de Einstein, na qual partículas de teste, com massas desprezíveis, afastam-se umas das outras de acordo com a lei de Hubble. A solução de De Sitter foi obtida para um universo des-

provido de matéria, mas com uma *constante cosmológica* não-nula. Como veremos mais adiante, o modelo de De Sitter renascerá com as teorias inflacionárias. Soluções das equações de Einstein, no caso de universos isotrópicos e homogêneos, que prevêem uma expansão em acordo com a lei de Hubble, foram obtidas por A. Friedmann e G. Lemaître, respectivamente em 1922 e 1927, e redescobertas independentemente por H. P. Robertson em 1928. Se Hubble foi influenciado ou não por esses trabalhos, ao publicar suas observações, é um tema controverso, embora mencione explicitamente o *efeito de Sitter* no fim de seu artigo de 1929.

Se observamos uma expansão, é evidente que o estado em que se encontrava o universo num passado remoto poderia ser descrito por uma concentração muito mais importante das galáxias e da matéria em geral. O inverso da constante de Hubble (na realidade, H_0 deveria ser chamado de parâmetro de Hubble, pois varia com o tempo) tem a dimensão de um *tempo* e o seu valor é um indicativo da idade do início do processo de expansão. A teoria geral da relatividade, que é uma teoria geométrica da gravitação, nos ensina que a idade do universo depende de dois parâmetros: o primeiro é o parâmetro de Hubble e o segundo, o chamado parâmetro de densidade Ω . O parâmetro de densidade contabiliza toda a energia-matéria presente no universo e a teoria geral da relatividade nos diz que, se seu valor for inferior ou igual a um certo limite crítico, a expansão observada perdurará para sempre, enquanto um valor superior significa uma reversão futura da expansão para um estado de contração. Como veremos mais adiante, as observações atuais sugerem um valor para Ω igual ou muito próximo do valor crítico, enquanto observações de estrelas variáveis do tipo cefeidas, indicadoras de distância, feitas com o telescópio espacial Hubble, permitem estimar H_0 como sendo igual a 65 ± 5 km/s/Mpc. Estes dois valores indicam uma idade para o universo da ordem de 14-15 bilhões de anos, em acordo com determinações recentes de idades de aglomerados

globulares, que se situam entre os objetos mais velhos da galáxia e que são da ordem de 12-14 bilhões de anos.

NOVOS FATOS

Se a expansão do universo, a partir de um estado inicial extremamente denso, é uma consequência natural da lei de Hubble, existem evidências sugerindo que tal estado inicial, além de denso, deve ter sido igualmente extremamente quente. Vejamos como se desenvolve tal argumento.

A atual teoria da evolução estelar nos permite entender toda a cadeia de reações nucleares que ocorrem no interior das estrelas, efetuando a síntese dos elementos a partir do hidrogênio até o ferro, que é o elemento nuclearmente mais estável (elementos mais pesados são produzidos provavelmente nas explosões de supernovas). Como consequência, as variações de abundâncias químicas em diferentes locais da galáxia e entre galáxias são apenas um reflexo da eficiência do processo de formação estelar, mais ou menos intensa segundo a região (ou galáxia) observada. No entanto, o hélio parece ser uma exceção. Sua abundância em relação ao hidrogênio (mais ou menos na razão 1 para 12 em número) é estranhamente uniforme em todo o universo. Vamos supor, inicialmente, que todo He presente no universo foi sintetizado pelas estrelas a partir do H. A física nos ensina que, para cada núcleo de He formado a partir da fusão de quatro prótons, uma quantidade de energia da ordem de 26.9 MeV (4.3×10^{-5} erg) é liberada sob a forma de radiação. Ora, como conhecemos a abundância do He, podemos calcular a densidade de energia radiativa que as estrelas teriam produzido, sintetizando tal elemento durante a história do universo. Tal valor resulta ser da ordem de $0.4 \text{ eV} \cdot \text{cm}^{-3}$, que é cerca de 15-17 vezes maior do que o valor observado! Isso significa que, para produzir todo He existente, as galáxias deveriam, em média, ter sido entre 15-17 vezes mais brilhantes do que são. Esse fato foi

constatado pela primeira vez em 1964 por Fred Hoyle e R. J. Tayler, astrofísicos ingleses que suspeitaram de uma origem cosmológica para o He.

Na realidade, uma origem cosmológica para os elementos químicos já havia sido aventada por George Gamow e seus estudantes, Ralph Alpher e Robert Herman, no fim da década de 40. Eles supuseram um universo primitivo extremamente quente, constituído essencialmente de nêutrons. Sendo os nêutrons instáveis, ao cabo de 14,8 minutos desintegram-se espontaneamente em prótons, elétrons e antineutrinos. Devido à expansão, a temperatura diminui até atingir valores nos quais prótons e nêutrons podem interagir para produzir elementos químicos mais complexos. Embora a teoria de Gamow-Alpher-Herman não estivesse correta nos detalhes, ela é efetivamente precursora de dois aspectos fundamentais da cosmologia moderna. O primeiro, que voltaremos a considerar mais adiante, refere-se à síntese dos elementos químicos, já que atualmente admitimos que pelo menos alguns elementos leves como ^2D , ^3He , ^4He e ^7Li foram produzidos nos primeiros instantes do universo. O segundo refere-se a uma importante previsão: de acordo com a teoria de Gamow-Alpher-Herman, deveríamos hoje estar *imersos* num campo de radiação de fundo, cuja temperatura deveria ser da ordem de 5 K! Esse trabalho ficou *esquecido* durante quase quinze anos, até que Robert Dicke, em Princeton, nos anos 60, construiu um detector de microondas para procurar tal radiação, mas a descoberta, totalmente acidental, coube a Robert Wilson e Arno Penzias em 1965, usando o radiotelescópio Holmdel, dos Laboratórios Bell, em Nova Jersey.

Após sua descoberta, tal radiação de fundo tem sido extensivamente estudada via satélites (Cobe, WMAP e, futuramente, Planck), bem como via balões (experiências Maxima e Boomerang). Graças a tais experimentos, sabemos que a radiação de fundo é altamente isotrópica, possui um espectro de corpo negro de temperatura $T = 2.72528 \pm 0.00065 \text{ K}$ e apresenta flutua-

ções da ordem de $\Delta T/T \approx 3 \times 10^{-5}$ em escalas angulares da ordem de 10° . A função de autocorrelação angular das flutuações de temperatura, determinada a partir dos experimentos mencionados, possui picos que nada mais são do que o resultado de oscilações acústicas, com escalas da ordem do horizonte, presentes no instante do desacoplamento entre radiação e matéria. A posição de tais picos sugere que a geometria de nosso universo é “plana” (parâmetro total de densidade $\Omega_T = 1$) e que a densidade de bárions é consistente com aquela deduzida da nucleossíntese primordial. Essas propriedades impõem vínculos importantes para qualquer modelo do universo primitivo, como veremos mais adiante.

O desenvolvimento tecnológico dos instrumentos instalados no solo, ocorrido na última década, contribuiu igualmente para uma nova visão do universo. Entre outros, podemos mencionar o levantamento de velocidades radiais de galáxias feito com o espectrógrafo 2dF (a multifibras ópticas), instalado no telescópio anglo-australiano, capaz de observar simultaneamente 400 objetos num campo da ordem de 3 graus quadrados. Cerca de 230.000 galáxias foram observadas, confirmando resultados de levantamentos anteriores, incluindo um número inferior de galáxias. Em escalas inferiores a 100-150 Mpc, a distribuição tridimensional das galáxias apresenta inúmeras estruturas: *filamentos*, *nodos* (onde se encontram os aglomerados ricos) e *regiões “vazias”*. Essas regiões desprovidas de galáxias podem ser a contrapartida negativa dos superaglomerados ou o reflexo de condições complexas ligadas ao processo de formação das galáxias e de sua subsequente evolução dinâmica. As conclusões desses estudos sugerem um universo *isotrópico e homogêneo* somente para escalas superiores a 200 Mpc.

A distribuição estruturada das galáxias, denominada “teia cósmica”, pode ser reproduzida através de simulações numéricas, no contexto de um universo dominado por matéria “não-bariônica escura”, cujas interações são unicamente de origem gravitacional. Um dos grandes sucessos desse

modelo é sua capacidade de explicar corretamente o espectro de potência (em escalas da ordem de 3-100 Mpc) deduzido dos levantamentos da distribuição das galáxias, reflexo do espectro das flutuações primordiais. Entretanto, em escalas menores (da ordem de 1-2 Mpc), relevantes ao processo de formação de galáxias, inúmeras dificuldades persistem. Voltaremos mais tarde a essa questão.

Em fins de 1998, dois grupos estudando distâncias de galáxias e usando como “marcos quilométricos” as supernovas de tipo Ia (SNIa) encontraram evidências de que a expansão do universo é presentemente *acelerada*. Essa descoberta implica a presença de uma nova componente com propriedades especiais, capaz de agir como uma força “antigravitacional”. Esse efeito pode ser simulado através da famosa *constante cosmológica*, originalmente introduzida por Einstein em suas equações de campo, ou através de um campo escalar com propriedades particulares, usualmente denominado “quintessência”.

A expansão do universo, descoberta por Hubble nos anos 30, a constatação da uniformidade da abundância do He nas galáxias, bem como a dificuldade em sintetizar a quantidade observada desse elemento no interior das estrelas; a existência de uma radiação de fundo, isotrópica, com um espectro de corpo negro; a teia cósmica e a aceleração da expansão constituem as bases observacionais da cosmologia moderna.

A EVOLUÇÃO DO MODELO PADRÃO: O BIG-BANG

Os constituintes do universo e suas interações

Uma descrição do universo primordial requer necessariamente uma abordagem prévia das interações existentes na natureza e das partículas elementares. É o que

procuraremos transmitir a um leitor, não-especialista, em poucas palavras.

As interações fundamentais da natureza são em número de quatro, descritas por campos, cujos *quanta* são bósons (partículas de spin inteiro), *mensageiros* das interações entre partículas. As interações *fortes* envolvem os hádrons, dos quais o próton e o nêutron são exemplos. Os mensageiros das interações fortes são os glúons, *quanta* de massa nula e que podem existir em oito estados distintos denominados *cores*. As interações *fracas* representam o segundo tipo de força fundamental da natureza, intervindo, por exemplo, no decaimento do nêutron ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$). Os mensageiros são bósons massivos (cerca de 90 vezes a massa do próton) com carga, W^\pm , ou sem, Z^0 . O terceiro tipo de interação é a *eletromagnética*, envolvendo partículas carregadas e fótons (*quanta* de massa nula e sem carga) como mensageiros. Finalmente, temos a *gravitação*, que ocupa um lugar especial entre as forças da natureza, pois a teoria geral da relatividade é uma teoria de base geométrica, embora admita, igualmente, um formalismo que permite sua associação com um mensageiro de massa nula, o gráviton. A Tabela 1 resume as principais características das forças elementares.

As partículas elementares, isto é, sem estrutura, são os léptons e os quarks. Todos eles são férmions, ou seja, possuem um spin semi-inteiro. Os léptons, em número de seis, são o elétron, o múon e o tau, todos com carga elétrica negativa, e a cada um deles está associado um neutrino sem carga

TABELA 2

LÉPTONS COM CARGA ELÉTRICA

Tipo	Vida média (s)	Massa (MeV)
e^-	Estável	0.511
μ^-	2.2×10^{-6}	105.6
τ^-	2.9×10^{-13}	1777.0

($e^- \leftrightarrow \nu_e$; $\mu^- \leftrightarrow \nu_\mu$; $\tau^- \leftrightarrow \nu_\tau$). Todos eles possuem uma antipartícula associada. O elétron é estável, mas os outros dois léptons logo se desintegram, numa escala de tempo relativamente curta. Evidências experimentais recentes sugerem que os neutrinos possuem massa e podem “oscilar” entre os diferentes tipos. As principais propriedades dos léptons com carga estão resumidas na Tabela 2.

Os quarks (e os antiquarks) estão classificados em *sabores* (*flavors*, em inglês) tais como: *u* (*up*), *d* (*down*), *s* (*strange*), *c* (*charm*), *t* (*top*) e *b* (*bottom*). Os quarks possuem carga fracionária e são os constituintes dos hádrons. Estes estão divididos em duas categorias: os bárions, igualmente férmions, constituídos essencialmente de três quarks “leves” (u,d), como o próton (uud) e o nêutron (udd). Os bárions contendo outros tipos de quarks são denominados híperons, como o caso da partícula Λ (uds). A segunda categoria de hádrons são os mésons, constituídos de um quark e de um antiquark e, ao contrário dos bárions, são bósons. Exemplos são o méson π^+ ($u\bar{d}$) e o méson K^+ ($u\bar{s}$), com massas respectivamente iguais a 140 MeV e 500 MeV. As propriedades dos quarks estão dadas na Tabela 3.

TABELA 1
FORÇAS ELEMENTARES

Interação	Intensidade	Mensageiro	Massa (GeV)
Forte	$g^2/\hbar c \approx 10$	glúons	0
Eletromagnética	$e^2/\hbar c = 1/137$	fótons	0
Fraca	$\frac{G_F m_p^2 c}{\hbar^3} \approx 10^{-5}$	W^\pm, Z^0	80.4, 91.2
Gravitacional	$Gm_p^2/(\hbar c) \approx 5.9 \times 10^{-39}$	grávitons	0

TABELA 3
OS QUARKS

“sabor”	carga	Massa (MeV)
u	+ 2/3	~ 2.0-5.0
d	- 1/3	~ 3.0-9.0
s	- 1/3	150
c	+ 2/3	1 100-1400
b	- 1/3	4100-4400
t	+ 2/3	173.8 GeV

A história térmica do universo

A descrição do universo, em seus primeiros instantes, é feita combinando-se a teoria geral da relatividade, que nos diz como o espaço-tempo evoluiu, com as propriedades da matéria, diante dos nossos conhecimentos atuais das interações fundamentais. Admite-se que, para tempos inferiores ao chamado “tempo” de Planck, definido pela relação $t_p = (\frac{\hbar G}{c^5})^{1/2} \approx 5.4 \times 10^{-44} \text{ s}$, uma teoria quântica da gravitação (ainda não existente) é necessária. Assim sendo, começaremos a descrever o cenário evolutivo do universo primitivo a partir de instantes próximos ao tempo de Planck.

Nos primeiros instantes é provável que o universo não se encontrasse em equilíbrio termodinâmico, pois a “rapidez” das interações entre partículas era inferior à “rapidez” da expansão em si. Essa situação irá se reverter quando a idade do universo ultrapassar $t \sim 10^{-38} \text{ s}$. A partir desse instante podemos supor que a evolução se faça em equilíbrio, isto é, que a temperatura seja a mesma para todas as partículas que constituem o plasma cósmico, variando como $T \propto t^{-1/2}$, em outras palavras, decrescendo com o inverso da raiz quadrada da idade do universo. Para tempos inferiores a $t_* \approx 10^{-34} \text{ s}$, as forças elementares da natureza (exceto a gravitacional) estão unificadas e o universo está constituído essencialmente por glúons, fótons, léptons e bósons W^\pm, Z^0 e X, Y . Estes dois últimos, bósons supermas-

sivos $m_{X,Y} \sim 10^{14-15} \text{ GeV}$, possuem três cores como os quarks e cargas fracionárias (4/3 para o X e 1/3 para o Y). O universo, nesses primeiros instantes, é perfeitamente simétrico, com um número igual de partículas e antipartículas.

Quando o instante t_* é atingido, a temperatura do universo é da ordem de $T \sim 1.2 \times 10^{27} \text{ K}$. Nessa temperatura, a interação forte separa-se das demais, fraca e eletromagnética, que permanecem unificadas. É o fim da chamada grande unificação das três forças. Os bósons e antibósons X, Y se aniquilam e desaparecem. Provavelmente, na mesma época, interações violando a conservação da carga bariônica ocorreram, quebrando a simetria matéria-antimatéria, introduzindo um pequeno excesso de quarks em relação aos antiquarks, na proporção de aproximadamente $1:10^9$. Isso significa que, para cada bilhão de quarks e antiquarks, há um quark a mais. Essa pequena diferença é suficiente para explicar o universo atual (e mesmo a existência da vida) pois, caso a simetria fosse mantida, todas as partículas (e antipartículas) teriam sido convertidas em radiação. O processo que gera tal assimetria é denominado “bariogênese”. É provável que o excesso bariônico conduza igualmente a um excesso leptônico, necessário para conservar globalmente a carga elétrica, mas não nos estenderemos aqui nessa questão.

É igualmente provável que, nas vizinhanças do instante t_* , a expansão do universo passe a ser dominada pela energia de novo campo, provavelmente escalar, que produzirá uma fase de expansão exponencial (tipo De Sitter), denominada *inflação*. Terminado o período inflacionário, o universo segue novamente uma evolução tipo Friedmann. Pela sua importância, examinaremos a época inflacionária com um pouco mais de detalhes mais adiante.

A etapa seguinte ocorre no instante $t \sim 10^{-10} \text{ s}$, quando a temperatura atinge $T \sim 10^{15} \text{ K}$. Nessa temperatura, desaparecem os bósons W^\pm e Z^0 e separam-se as forças fraca e eletromagnética. Os núcleons, tais como o próton e o nêutron, ainda não apareceram, e da composição do plasma cósmico

mico fazem parte agora somente os fótons, glúons, léptons e quarks, mas um perfeito equilíbrio em número destes últimos com os antiquarks (e, talvez, com os antiléptons) não mais existe.

O processo de expansão produz um resfriamento contínuo do universo e uma nova etapa importante ocorre em $t \sim 2.5 \times 10^{-5}$ s, quando a temperatura atinge um valor da ordem de $T \sim 2.3 \times 10^{12}$ K, que corresponde a uma energia térmica da ordem da massa do méson π . Nesse momento, os quarks não mais podem permanecer livres e formam partículas mais complexas, os hádrons. O processo é equivalente a uma transição de fase: passagem da fase “quark” para a fase “hádron”, onde todos os quarks estão confinados no interior de tais partículas. A transição é feita em condições de temperatura e de pressão constantes. Como a densidade de energia na fase quark é superior à da fase hádron, a diferença é usada para manter a temperatura constante, compensando assim o resfriamento que teria ocorrido durante a transição devido à expansão do universo. O pequeno excesso de quarks em relação aos antiquarks converte-se, após a transição, num pequeno excesso de hádrons em relação às suas antipartículas, o que explica a existência de matéria hoje no universo e nossa própria existência!

Além do próton e do nêutron, outros hádrons são criados durante a transição mas, por terem uma vida média muito curta, logo se desintegram e desaparecem. A densidade de nêutrons relativa à dos prótons é fixa pelos valores de equilíbrio, isto é

$$\frac{n}{p} = e^{-\frac{\Delta m_n c^2}{kT}}$$

onde $\Delta m_n c^2 = 1,294$ MeV corresponde à diferença entre as massas do nêutron e do próton, medidas em termos de energia, e k é a constante de Boltzman. Enquanto as reações



e

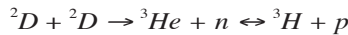


forem balanceadas, a razão n/p será dada pela equação anterior. Quando a “rapidez” dessas reações for inferior à “rapidez” da expansão, cessa o equilíbrio e, em seguida, a razão n/p é controlada essencialmente pelo decaimento do nêutron. Quando o equilíbrio deixa de existir, a temperatura é da ordem de $T \sim 10^{10}$ K e a razão n/p é igual a 0,222. Nessa temperatura, os neutrinos do elétron e do múon não mais estão em equilíbrio térmico com o meio, desacoplando-se do plasma cósmico, evoluindo de forma independente. No banho térmico restam ainda, como léptons, os elétrons e os pósitrons, uma vez que os múons já se aniquilaram logo após a transição de fase quark \rightarrow hádron.

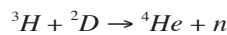
Outros processos iniciam-se quando $T \sim 10^{10}$ K, correspondendo a uma idade do universo da ordem de alguns segundos. Tais processos, envolvendo reações entre núcleons, são responsáveis pelo aparecimento de alguns elementos leves e de seus isótopos. Entramos na chamada *era da nucleossíntese primordial*. Inicialmente, através da interação entre nêutrons e prótons, forma-se o deutério (isótopo do hidrogênio), via a reação



que ocorre em condições próximas do equilíbrio. Isso significa que o deutério é produzido mas igualmente destruído, o que impede que sua abundância cresça. Somente quando a temperatura cai para $T \sim 10^9$ K (o universo possui então *dois* minutos de idade) o equilíbrio da reação acima se rompe e a abundância do 2D começa a aumentar. Quando a concentração do deutério é da ordem de $\sim 10\%$, iniciam-se as reações



e



A abundância final de hélio depende da quantidade de nêutrons presente no banho térmico e, em geral, a abundância é uma

função do número de bárions. Ao fim de poucos minutos, o processo de nucleossíntese primordial “congela-se”, isto é, a temperatura agora não é mais elevada o suficiente para manter as reações nucleares e as proporções entre os vários elementos não mais se alteram. Em ordem decrescente de abundância, os elementos produzidos pela nucleossíntese primordial são o ^4He , ^2D , ^3He e ^7Li . Os demais são produzidos em quantidades desprezíveis. É importante mencionar o fato de que a abundância química observada desses elementos não pode ser explicada pela nucleossíntese estelar, enquanto as previsões resultantes da nucleossíntese primordial são compatíveis com os dados atuais.

Quando o universo atinge uma idade da ordem de quatro segundos, sua temperatura compara-se com a energia de repouso dos elétrons e pósitrons ($T \sim 5.9 \times 10^9 \text{ K}$) que iniciam um processo de mútuo aniquilamento. A energia liberada nesse processo é dada ao banho térmico que, nessa época, está constituído essencialmente por fótons. Como os neutrinos não mais estão em equilíbrio com a radiação, não recebem sua parte da energia liberada pelo desaparecimento dos pares e^-e^+ . Assim, a temperatura dos neutrinos “fósseis” é ligeiramente inferior à dos fótons: $T_\nu = 0.7137T_\gamma$.

O universo continua sua expansão e seu resfriamento contínuo até a temperatura atingir um valor da ordem de 6.000 K. Nesse momento, sua idade é aproximadamente 120.000 anos. Em tal temperatura, prótons e elétrons começam a recombinar-se formando átomos de hidrogênio. Até então, os fótons para interagir com os elétrons “livres” percorriam, em média, uma distância inferior às dimensões (da época) do universo. Essa situação se modifica com a recombinação do hidrogênio e, como consequência, o acoplamento entre radiação e matéria deixa de existir. Assim, estudando-se hoje as propriedades da radiação de fundo, estamos observando as condições físicas do universo quando tinha apenas 120 mil anos. É o máximo onde podemos ir no passado, já que em épocas mais distantes o universo é completamente opaco à radia-

ção. A investigação das condições físicas do banho térmico em tempos mais remotos requer a utilização de outros mensageiros, como por exemplo as ondas gravitacionais primordiais.

A recombinação do hidrogênio representa também o fim da *era radiativa*, pois até então a densidade de energia-matéria do universo foi dominada pelos fótons e por partículas relativísticas. A partir desse momento, a densidade energia-matéria é devida essencialmente à massa dos bárions presentes, dando início à *era da matéria*.

No período entre um milhão e 100 milhões de anos após o big-bang, situa-se a época em que se formaram as galáxias e, provavelmente, as grandes estruturas (aglomerados e superaglomerados) que observamos hoje.

No fim da década de 80, o presente autor sugeriu que na época de formação das galáxias e das primeiras estrelas, correspondendo a um desvio para o vermelho $z \sim 5-6$, poderia ter ocorrido uma reionização do gás intergaláctico, sem que houvesse uma distorção importante no espectro da radiação de fundo e sem que os limites no fluxo de fótons Ly- α fossem violados. Observações recentes do espectro de quasares distantes parecem sugerir que este é o caso, o que nos forneceria um importante diagnóstico do processo de formação das primeiras estrelas no universo.

A NECESSIDADE DE UMA ERA INFLACIONÁRIA

Estudos detalhados do espectro da radiação de fundo, feitos no início dos anos 90 pelo satélite Cobe (Cosmic Background Explorer) e mais recentemente (2003) por WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), mostraram que a distribuição de energia não somente pode ser representada com grande precisão por uma lei de Planck, mas também possui uma importante homogeneidade de suas propriedades físicas em grandes escalas angulares. Esse último aspecto é altamente enigmático devido à

existência de horizontes em cosmologia.

O horizonte é a maior distância que podemos observar, definindo igualmente um volume dentro do qual houve contato causal. O horizonte deve ser calculado em função da geometria do universo. Para exemplificar, consideremos um universo dominado pela matéria, com densidade igual ao valor crítico $\Omega_m = 1$. Neste caso, a distância própria R_e percorrida por um fóton emitido no instante t_D do desacoplamento radiação-matéria é

$$R_e = \frac{2c}{H_0} [1 - (T_0/T_D)^{1/2}]$$

onde $T_0 = 2.72$ K e $T_D = 3000$ K são respectivamente as temperaturas da radiação de fundo hoje e no instante t_D . Por outro lado, o horizonte no instante t_D , *observado hoje*, é $d_H = \frac{2c}{H_0} (T_0/T_D)^{1/2}$. Nesse caso, a distância angular máxima para a qual devemos esperar ter havido contato causal é $\theta \approx d_H/R_e \approx 1.8^\circ$. No entanto, a radiação de fundo é homogênea em escalas angulares muito maiores, deixando sem resposta o porquê de tal uniformidade em regiões que nunca tiveram um contato causal.

Um segundo problema refere-se à “planura” do nosso universo. Como já mencionamos anteriormente, a densidade de energia-matéria do universo é muito próxima do valor crítico, ou seja, $\Omega_0 \approx 1$. Isso significa que nosso universo tem uma geometria espacial plana. Uma análise detalhada das equações de Friedmann, obtidas da teoria geral da relatividade, indica que se o parâmetro Ω_0 for próximo da unidade hoje, então *sempre* deve ter sido. Assim, se atualmente o parâmetro de densidade estiver compreendido no intervalo $0.2 < \Omega_0 < 2.0$, o valor inicial não pode diferir da unidade com uma precisão de $|1 - \Omega| = 3.7 \times 10^{-59}$!!!

A questão da planura do nosso universo não pode ser separada da questão de sua “velhice”. Devemos lembrar que, se a densidade energia-matéria ultrapassar o valor crítico, qualquer expansão inicial se reverterá futuramente num colapso. Assim, se numa fase inicial próxima ao tempo de Planck, digamos $t \approx 10^{-43}$ s, o parâmetro de densidade fosse igual a $\Omega \sim 1.1$, o universo

colapsaria em 10^{-42} s. Um universo com a idade do nosso requer que a condição $\Omega \approx 1$ seja satisfeita desde suas fases iniciais.

Esses aspectos concernentes ao horizonte e à planura do universo sugerem que o mesmo foi formado com condições iniciais muito particulares e gostaríamos de entender o porquê. Nada nos modelos baseados na teoria geral da relatividade nos faz imaginar tal “ajuste fino” nas condições iniciais. Isso poderia significar que a teoria é incompleta e que necessitaríamos de modificações capazes de levar em conta naturalmente as particularidades das condições iniciais.

Modificações na teoria do big-bang foram introduzidas por Alan Guth em 1980 e, posteriormente, por A. Linde e P. Steinhardt em 1981, constituindo as bases do chamado modelo inflacionário. Vejamos quais as idéias básicas que procuram, dentro de uma nova concepção, descrever os primórdios de nosso universo.

Como vimos na seção precedente, para tempos inferiores a 10^{-34} s as três grandes forças da natureza, a forte, a fraca e a eletromagnética, encontram-se unificadas. Na realidade, elas seriam as componentes de um campo de força único, cujos mensageiros são bósons superpesados. Nesse período, podemos imaginar o estado físico do universo como o de um líquido se resfriando e atingindo o ponto em que ocorre a solidificação. A teoria nos diz que, nesse momento, o universo entra num estado de energia *alta, singular e instável*, denominado de “falso vácuo”. Na nossa analogia com o fluido, seria similar à água que tivesse se resfriado abaixo do ponto de congelamento, mas permanecido no estado líquido. Num breve instante que perdura tal situação, uma *pressão* enorme se desenvolve no espaço, acelerando a expansão do universo. As dimensões do universo dobram a cada 10^{-34} s e, em apenas 10^{-32} s, período que dura a incursão no falso vácuo, a escala do mesmo cresce de um fator da ordem de 10^{50} ! Esse curtíssimo intervalo de tempo é denominado *inflação*.

Durante a inflação, a pressão devida ao falso vácuo permanece constante e é *nega-*

tiva. Para que possamos entender isso, imaginemos um cilindro com um pistão móvel. O interior do cilindro está ocupado pelo falso vácuo, com uma densidade *constante* de energia e_v , enquanto no exterior domina o vácuo verdadeiro, com uma densidade de energia nula. Se o pistão se desloca para o exterior de um comprimento Δl e se sua secção transversal for A , a variação do volume do cilindro é igual a

$$\Delta V = A\Delta l$$

Como a densidade de energia do vácuo é constante, a energia do sistema aumenta de

$$\Delta E = e_v \Delta V$$

Esse aumento de energia deve ser necessariamente o resultado do trabalho feito para expandir o volume do cilindro. Como a pressão externa é nula, a pressão interna, devida ao falso vácuo, deve ser *negativa* de modo que tenhamos

$$\Delta E = -p_v \Delta V$$

o que significa, usando as relações anteriores, que $p_v = -e_v$. Uma estimativa da densidade de energia do falso vácuo pode ser obtida usando a energia da escala da grande unificação, isto é, a massa dos bósons X , Y ou seja

$$e_v \approx \frac{m_X^4 c^5}{\hbar^3} \sim 10^{94} \text{ erg.cm}^{-3}$$

Do ponto de vista formal, a ação do vácuo pode ser representada nas equações da teoria geral da relatividade, através da introdução da chamada *constante cosmológica*. Tal constante foi introduzida pelo próprio Einstein dentro de um contexto diferente, pois procurava modelos de universo *estáticos*. Com a descoberta da expansão do universo por Hubble e Humason, Einstein retirou tal constante de suas equações mas hoje a recuperamos dentro de uma nova interpretação. Com tal constante, representando agora a densidade de energia do vácuo, as equações de Einstein permi-

tem soluções em que a escala do universo cresce de forma exponencial, tal como no modelo de De Sitter.

Tendo retornado ao vácuo real, o universo prossegue sua expansão em ritmo mais lento, tal como descrito na seção anterior, mas com importantes diferenças. O problema do horizonte fica resolvido. Regiões que, antes da inflação, tiveram contato causal e tiveram a ocasião de homogeneizar suas condições físicas, foram “arrastadas” longe umas das outras, fora de qualquer possibilidade de contato. Hoje, essas regiões entram no nosso horizonte, com propriedades similares às que tinham antes do início da inflação. Por exemplo, consideremos duas regiões A e B em fronteiras opostas do horizonte de um observador situado numa época um pouco antes da inflação. A separação entre elas é da ordem de 10^{-24} cm. Com a inflação, a escala do universo cresce de um fator da ordem de 10^{50} , o que significa que as duas regiões A e B estão agora separadas por 10^{26} cm, ou aproximadamente 30 Mpc. No intervalo de tempo que dura a inflação, cerca de 10^{-32} s, o horizonte se expande com velocidade próxima à da luz e tem uma dimensão de apenas 10^{-21} cm! Assim, nesse período, o espaço expande-se com uma velocidade muito maior que a da luz, levando para fora do horizonte regiões que antes se encontravam no seu interior. O leitor não deve se preocupar, pois a teoria restrita da relatividade impõe limites para a velocidade somente para a matéria e energia, não para o espaço em si. Com o fim da inflação, o horizonte volta a crescer mais rápido do que a expansão, fazendo com que as regiões A e B voltem a ser “visíveis” por um observador atual.

Da mesma forma, a inflação resolve igualmente o problema da planura inicial, pois a escala do universo, tendo sido multiplicada por um fator 10^{50} , produz uma curvatura espacial praticamente nula.

Se os modelos inflacionários explicam de forma convincente a questão do horizonte e da planura inicial, devem fazer face igualmente a dificuldades. Como vimos, a origem do mecanismo inflacionário está nos

campos de Higgs, que descrevem a grande unificação das forças. No entanto, em tal teoria quarks podem se transformar em léptons e vice-versa. Como consequência, no interior de um próton, os dois quarks u podem interagir via um bóson X , dando origem a um lépton (o pósitron), e um antiquark d . Esse processo provoca a desintegração do próton segundo o esquema $p \rightarrow e^+ + \pi^0$, já que o antiquark d e o quark d restante dão origem a um méson π^0 . A vida média prevista para esse mecanismo de desintegração é da ordem de $10^{31 \pm 2}$ anos mas, até o presente, tal processo não foi ainda observado.

Atualmente, os cosmologistas não mais se preocupam com uma possível conexão entre campos ligados à grande unificação e aqueles que possam levar o universo a uma fase inflacionária. Estes últimos são denominados hoje simplesmente *inflavons*. Em geral, independentemente do inflaton “ ϕ ” utilizado, os modelos inflacionários estão baseados na hipótese de que o estado inicial do universo corresponde ao de equilíbrio termodinâmico. O inflaton “ ϕ ” encontra-se num estado que corresponde a um mínimo de energia do vácuo. Mais recentemente, o cenário inflacionário tem sido estudado num contexto em que *todos os estados térmicos são possíveis* e o inflaton “ ϕ ” possa corresponder a um valor qualquer do vácuo. Esta generalização das condições denomina-se “inflação caótica”.

Além dos problemas do horizonte e planura inicial, os inflavons têm sido estudados dentro de outras perspectivas. Campos de natureza quântica estão submetidos a flutuações que geram variações na densidade do banho térmico. Tais variações de densidade, da ordem de $\Delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$, são necessárias para explicar a formação de galáxias e das estruturas observadas em grande escala. Na realidade, após correção das diferentes fontes de emissão que perturbam as medidas da radiação de fundo (correções difíceis, por isso incertas), as cartas do céu baseadas nas observações dos satélites Cobe e WMAP indicam flutuações de temperatura da ordem de $\Delta T/T \sim 10^{-5}$ K,

que poderiam corresponder às flutuações de densidade requeridas. Esses resultados vão ser reavaliados através de um novo experimento a ser realizado futuramente por uma missão espacial européia, Planck, que estudará tais flutuações com uma precisão sem precedentes.

Flutuações dos inflavons produzem, igualmente, flutuações na métrica do universo ou, em outras palavras, no espaço-tempo. Flutuações no espaço-tempo podem ser identificadas como *ondas gravitacionais*. Do ponto de vista quântico, pares virtuais de partículas são espontaneamente criados e destruídos. Os *quanta* associados às ondas gravitacionais são os *grávitons*, igualmente submetidos aos processos de criação e de destruição. Durante a inflação, pares virtuais são separados muito mais rapidamente do que o processo de aniquilação no vácuo, tornando os pares virtuais em pares reais. Devido à sua fraca interação com a matéria, tais ondas, se produzidas, constituem hoje uma radiação gravitacional de fundo, que pode nos informar sobre as condições físicas do universo primitivo. Lembremos que o universo só é transparente aos fótons a partir da época da recombinação. As ondas gravitacionais atravessam essa “barreira” informando-nos sobre o período inflacionário, seja diretamente, seja pelas pegadas deixadas na radiação de fundo. Este último efeito pode ser entendido da seguinte maneira: as ondas gravitacionais produzem modificações periódicas no espaço-tempo, que causam alternadamente uma rarefação e uma compressão do plasma cósmico. Essas oscilações vão se manifestar como um efeito Doppler. Se a distorção do espaço-tempo é feita na direção do observador, os fótons emitidos pelo plasma cósmico terão um comprimento de onda mais curto, que será interpretado como uma flutuação positiva de temperatura. Se a distorção produzir um movimento no sentido inverso, a flutuação de temperatura será negativa. Estas flutuações de temperatura são análogas às produzidas por flutuações da densidade, mas com amplitude muito menor. Como então detectá-las? Em teoria, tal separação é re-

lativamente simples. Os fótons emitidos na época da recombinação podem ter sofrido uma última interação com um elétron situado numa flutuação, produzida seja por uma variação na densidade, seja por uma variação no espaço-tempo. Nesse caso, após o espalhamento, o fóton terá um estado de polarização muito bem-definido, distinto segundo a origem da flutuação. Este será um outro importante objetivo da missão Planck, obter cartas de polarização da radiação de fundo, visando a esclarecer a evolução do universo em seus primeiros instantes.

A MATÉRIA ESCURA

A natureza da matéria escura no universo é uma das questões fundamentais da física e da astrofísica contemporâneas. Esse problema está profundamente ligado à origem da teia cósmica e à formação das galáxias. Respostas a esse problema podem nos levar à descoberta de novas partículas e à natureza de suas interações.

Diferentes observações sugerem que a maior parte da matéria no universo é *não-luminosa e, provavelmente não-bariônica*. A curva de rotação de galáxias espirais luminosas é quase plana além dos limites ópticos. Essas observações, de fato, implicam a presença de matéria escura, mas somente para distâncias do centro superiores a 12-15 kpc. No entanto, em distâncias maiores, o estudo dinâmico de pares de galáxias em interação confirma a existência de tal componente escura. A dispersão de velocidades peculiares das galáxias pode, igualmente, testar a presença da matéria escura. Em 1992, Ruth Bruno e o autor, usando tal método, obtiveram para o parâmetro de densidade $\Omega_m = 0.30 \pm 0.06$. Tal valor, obtido há mais de uma década, concorda de forma notável com os resultados atuais de WMAP.

No caso do halo (escuro) de nossa galáxia, o mesmo tem sido estudado através da cinemática de aglomerados globulares e de galáxias anãs, satélites da Via Láctea. Sua massa é da ordem de $(1-2) \times 10^{12} M_\odot$, sendo

o limite inferior talvez o mais próximo da realidade (1).

Vários candidatos têm sido propostos para explicar a natureza da matéria escura no halo galáctico. Candidatos bariônicos tais como gás quente ou frio, assim como estrelas de pequena massa ($\sim 0.1 M_\odot$) foram excluídos pelas observações. Candidatos no intervalo de massa entre 10^{-7} e $10^{-2} M_\odot$ foram igualmente excluídos pelas observações de microlentes gravitacionais através de experimentos tais como Eros, Macho e Ogle. Uma vez que as “lentes” observadas devem ter massas próximas a $\sim 0.5 M_\odot$, sugestões têm sido feitas no sentido de uma possível identificação com anãs brancas. No entanto, tal hipótese acarreta inúmeras dificuldades. De um lado, carbono e nitrogênio seriam produzidos em quantidade excessiva, em desacordo com abundâncias observadas em estrelas do halo. Por outro lado, a detecção de fótons com energias da ordem do TeV provenientes de Markarian 501 (galáxia com um núcleo ativo) indica que a interação $\gamma\gamma' \rightarrow e^+e^-$ não produz uma atenuação importante dos fótons energéticos. Na reação em questão, os γ' são fótons infravermelhos produzidos pelos progenitores das anãs brancas. Logo, a detecção de Markarian 501 impõe limites à densidade de anãs brancas, que deve satisfazer $\Omega_{ab} < 0.003$. Atualmente não podemos afirmar ou negar que as microlentes sejam constituídas de matéria bariônica, deixando em aberto o caminho para diferentes possibilidades não-ortodoxas!

Não se pode excluir atualmente que o nosso halo (e os das demais galáxias) seja constituído por bósons do tipo Higgs, áxions, neutrinos escalares, etc. Bósons podem estar presentes no universo sob a forma de “nuvens difusas”, objetos compactos ou misturados com matéria ordinária. Bósons massivos podem ter tido um papel importante na formação da teia cósmica, uma vez que podem ser submetidos à instabilidade gravitacional, como demonstrado por Khlopov, Malomed e Zeldovich. Nesse caso, condensados bosônicos gravitacionais podem ter sido a origem de buracos negros primordiais. Tais buracos

1 M_\odot é a massa do Sol.



negros crescem por captura de matéria e podem constituir as “sementes” que darão origem às galáxias. Uma das dificuldades para formar tais configurações bosônicas compactas é a possível ausência de um mecanismo de resfriamento, capaz de dissipar o excesso de energia cinética. Sem tal mecanismo, o colapso gravitacional dá origem a um objeto difuso, mas não a um compacto. Esse problema foi recentemente estudado por Seidel e Suen, que mostraram a existência de um mecanismo similar à relaxação violenta, processo coletivo que ocorre em sistemas em que as colisões são desprezíveis.

A existência de uma quantidade substancial de matéria escura implica modificações do modelo padrão das partículas elementares. A única partícula do modelo padrão, com abundância cósmica adequada, é o neutrino. No entanto, neutrinos desacoplam-se do plasma primordial quando relativísticos, dificultando a formação de galáxias e, mais ainda, os resultados de WMAP implicam que podem contribuir ao balanço geral da matéria-energia presente no universo no máximo com 1.1%!

Extensões do modelo padrão ou teorias de supersimetrias (Susy) predizem uma série de partículas que poderiam constituir a matéria escura, tais como *sneutrinos*, *axinos*, *gravitinos*, *photinos*, *neutralinos* ou ainda partículas mais complexas como “bolas-Q”. Estas últimas são consequência de teorias em que campos escalares possuem uma propriedade conservativa ou carga Q . Podem ser consideradas como estados coerentes de *squarks*, *sleptons* e *campos de Higgs*. A secção eficaz de auto-interação é comparável à geométrica, o que tem atraído o interesse de inúmeros pesquisadores. A razão é que, auto-interagindo, redistribuem energia e/ou momento angular nos halos escuros, produzindo perfis de densidade compatíveis com as observações, isto é, sem singularidades no centro.

Partículas com massas da ordem de 10^{14-15} , denominadas *cryptons*, que poderiam ter sido produzidas em condições longe do equilíbrio termodinâmico, foram igualmente sugeridas com constituintes da ma-

téria escura, mas podem contribuir no máximo com um parâmetro de densidade da ordem $\Omega_x \sim 10^{-6}$.

Na extensão supersimétrica mínima do modelo padrão, a partícula estável mais leve é o *neutralino*. O neutralino $\tilde{\chi}$ é um férmion eletricamente neutro, do tipo Majorana, com massa provavelmente no intervalo $30 \text{ GeV} < m_{\tilde{\chi}} < 2.0 \text{ TeV}$, sendo o candidato preferido atualmente para constituir a matéria escura.

Inúmeros experimentos existem atualmente procurando detectar diretamente partículas de matéria escura, através da transferência de energia, após uma colisão elástica com um núcleon. Até o presente, os resultados têm sido negativos. Uma outra estratégia consiste na detecção possível dos produtos da aniquilação de um par de neutralinos, como neutrinos energéticos e fótons- g . Estudos recentes feitos em Nice mostram que a galáxia anã Sagitário, pela importante quantidade de matéria escura que possui e sua proximidade, constitui um alvo no qual o futuro telescópio de raios- g , Glast, poderá detectar um sinal, caso a massa do neutralino seja da ordem de 50 GeV.

A ENERGIA ESCURA

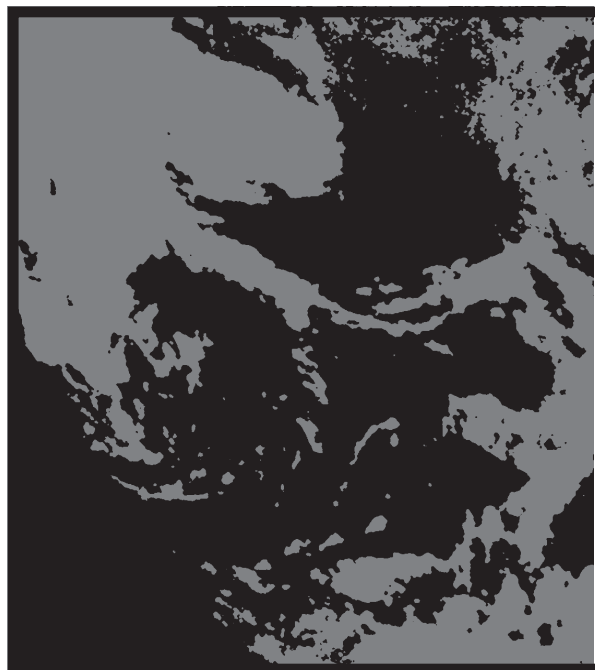
Como mencionamos anteriormente, o estudo da distância de galáxias longínquas através das SNIa mostrou que a expansão do universo é, presentemente, acelerada. Tais observações, quando combinadas com as de WMAP, indicam que vivemos num universo de geometria plana (a curvatura deve-se unicamente à componente temporal).

A solução mais simples para explicar tal aceleração consiste na reintrodução de uma constante cosmológica nas equações de campo, agora interpretada como sendo a “densidade de energia do vácuo”, tal como o descrito na seção em que o processo inflacionário foi discutido. A densidade de energia do vácuo hoje é comparável à da matéria, mas não pode ser dominante após o desacoplamento radiação-matéria. Se as-

sim fosse, as forças “repulsivas” teriam tido um papel preponderante e teria sido extremamente difícil a formação das estruturas que constituem a teia cósmica.

A constante cosmológica Λ é apenas uma das opções possíveis. Uma classe mais geral de modelos, denominados *quintessência*, tem sido explorada, onde a densidade de energia e a pressão (negativa) variam com o tempo. De um ponto de vista fenomenológico, três grandes categorias de modelos com um termo Λ dinâmico têm sido exploradas: 1) *modelos cinemáticos*, onde se admite que a densidade de energia do vácuo é simplesmente uma função do tempo; 2) *modelos hidrodinâmicos*, onde se introduz uma equação de estado $p_v = p_v(\epsilon_v)$ nas equações de Friedmann; 3) *modelos derivados de teorias de campo*, onde a densidade de energia do vácuo é obtida de um novo campo (clássico), descrito por uma densidade de lagrangeana fenomenológica. Mais recentemente, tem-se sugerido uma “unificação” das questões matéria e energia escuras, via um novo “fluido”, a *quartessência*.

Uma base física visando a uma interpretação da constante cosmológica foi dada em fins dos anos 60 por Y. B. Zeldovich e posteriormente desenvolvida por A. Shkarov.



Zeldovich constatou que as flutuações quânticas do vácuo, depois de convenientemente regularizadas para evitar as divergências, podem produzir um tensor energia-quantidade de movimento, formalmente idêntico a uma constante cosmológica. No entanto, se a escala de Planck for utilizada como um “*cutoff* ultravioleta” natural, a densidade de energia resultante é cerca de 120 ordens de grandeza maior que o valor atual! O problema persiste mesmo se utilizarmos um *cutoff* na escala da cromodinâmica quântica (2), pois ainda obtemos um valor 40 ordens de grandeza maior.

EPÍLOGO

Como mencionamos anteriormente, o paradigma da matéria escura nos permite entender a estrutura em grande escala do universo. A existência dessa matéria escura, numa quantidade da ordem de 7 vezes maior do que a dos bárions, é sustentada pela necessidade de explicar as forças gravitacionais agindo nas galáxias em diferentes escalas e os picos na função de autocorrelação angular, observados na radiação de fundo.



No entanto, se as simulações numéricas, em que a matéria escura é representada como um fluido “sem colisões”, interagindo somente via forças gravitacionais, explicam as grandes estruturas da teia cósmica, algumas dificuldades persistem. As simulações prevêm perfis de densidade nas regiões centrais dos halos escuros que não são compatíveis com as curvas de rotação observadas. Mais ainda, o número de galáxias-satélites previsto é muito maior do que o observado.

A formação das estruturas segue um processo hierárquico: estruturas menores formam-se inicialmente e fusionam-se sucessivamente para dar origem a estruturas maiores. Dentro desse esquema, fica difícil de entender o grande número de galáxias massivas, observadas pelo telescópio espacial Hubble, presentes em $z \sim 2 - 3$, bem como a galáxia recentemente descoberta por amplificação gravitacional, em $z \sim 10$! O cenário hierárquico prevê igualmente que, em média, as populações estelares em galáxias menos luminosas devem ser mais velhas do que as das galáxias mais brilhantes, formadas mais recentemente. No entanto, trabalhos em desenvolvimento, numa colaboração entre o Observatório da Côte d’Azur e a Universidade de São Paulo (IAG), sugerem exatamente o oposto: as galáxias mais luminosas possuem populações estelares mais antigas!

Apesar de todos esses extraordinários avanços, quer seja no domínio observacional, experimental ou teórico, encontramos-nos numa situação no mínimo constrangedora. Sabemos que o universo é constituído de 4% de bárions, dos quais apenas a metade é visível (formando estrelas ou constituindo o gás quente localizado no aglomerados de galáxias e detectado via raios-X). A matéria escura constitui cerca de 26% e a chamada “energia-escura” ou quintessência, os 70% restantes. Assim, o “lado escuro” do universo representa 98% de seus constituintes! Entretanto, esse “lado escuro” oferece aos físicos e astrofísicos linhas de pesquisa excitantes que, certamente, nos levarão a novas e inesperadas descobertas.

2 A teoria das interações fortes.